

## 熱機関のエントロピー表示について

著者	村田 浩
雑誌名	日本歯科大学紀要．一般教育系
巻	26
ページ	17-23
発行年	1997-03-20
URL	<a href="http://doi.org/10.14983/00000461">http://doi.org/10.14983/00000461</a>



# 熱機関のエントロピー表示について

On the Heat Engines expressed by Entropy

新潟歯学部 村 田 浩

Hiroshi MURATA : The Nippon Dental University, Hamaura-cho 1-8  
Niigata 951, JAPAN

(1996年11月29日 受理)

## § 1. はじめに

エネルギーや原料の資源が問題にされるようになってから久しい。歴史的には、エネルギー資源はどこまで有効に利用できるのか、その効率の限界を論ずるところから熱力学の形成がはじまった<sup>1)</sup>。ところが、近年のように、資源の大量消費と効率の限界近くまでの利用がなされるようになると、資源問題は、その不足ばかりでなく、廃棄物—環境問題としてとらえることが必要になってきた<sup>2)</sup>。

現在の石油文明のように、資源の利用が爆発的といっても良いほどに増大していつるときに、人類が存続していくためには、資源は循環的に再利用していかなければならない。原料資源の完全なリサイクルと再生可能なエネルギー資源の開発である。しかし、このいずれもが実現される道は遠い。その道筋では多くの誤りを正していかなければならない。前者については、例えば、ビール瓶を水で洗浄してまたビール瓶として使用するのは、洗浄で汚れた水が地球の水循環によってきれいな水に戻るということも含めてリサイクルと呼べるが、牛乳パックをトイレトペーパーに変えたり、アルミ缶を溶かして、自動車のアルミホイールにするのは資源のリサイクルではなくて一方通行の再利用にすぎない。この問題は別の機会に論ずることにして、ここでは、後者のエネルギー資源の問題について考えてみたい。

石油文明とも言われているように、現在利用されているエネルギーの大部分は熱エネルギーである。これには原子力も太陽光の比較的大規模な利用も含まれる。熱エネルギーの利用を論ずるには熱力学の法則が基本となる。そこで、まず、熱の基本的な性質について述べ、次に、それから導かれる熱機関の特性を良く表す図を示してみたい。この図によって、熱機関に関する多くの誤解を解くことができると思う。

## § 2. 熱力学の法則とエントロピー

熱力学の第一法則は“熱も含めたエネルギー保存の法則”である。また、第二法則は“熱は高温から低温の方向にしか（自然には）流れない”，とか“熱を全部仕事に変えるような効率 100 % の熱機関は存在しない”とか表される。第二法則のこれら二つの表現はそれぞれ、熱の流れと熱から仕事へのエネルギー転化という自然現象の進む方向性を示すものとして、まったく同等であることが証明されている<sup>3)</sup>。これら第一および第二法則に反するような熱機関をそれぞれ第一種および第二種永久機関と言い、もし、そのような機関が存在したならば、資源問題や環境問題もがいきよに解決されてしまうのであるが、熱力学の法則が正しいならば、そのような永久機関は、残念ながら、存在しない。

熱力学の第二法則は、また、“閉じた系のエントロピーは増大する”とも表される。ここで、エントロピーという物質の状態によって決まる量を次のように導入する。いま図1のように温度  $T$  の物体に（微小な）熱量  $Q$  が流れ込んできたとき、その物体のエントロピー  $S$  が  $\Delta S$  だけ増加したとすると、

$$\Delta S \geq \frac{Q}{T} \quad (1)$$

と表される。この流れが可逆過程のとき等号が成り立つので、物体のエントロピーは  $Q/T$  だけ増加し、不可逆過程ならそれ以上に増加するわけである。

ここで導入したエントロピーの増分  $\Delta S$  が閉じた系では必ず正になることと、熱が一方にしかながれないことが同等であるのは、図2のような例を考えれば解りやすい。図2で  $T_2$  は温度  $T_2$  の高温熱源（熱容量が大きな物体）、 $T_1$  は温度  $T_1$  の低温熱源、C は可逆的に熱を流すサイクル機構である。図2のように可逆サイクルCを使って高温から低温へと熱量  $Q$  をながしたとき、全系すなわち  $T_1$ 、 $T_2$  および C を含む系でエントロピーの増分は、式(1)の定義式から、

$$\Delta S_t = \left[ \frac{Q}{T_1} - \frac{Q}{T_2} \right] = \frac{\Delta T}{T_1 T_2} Q, \quad \Delta T = T_2 - T_1 \quad (2)$$

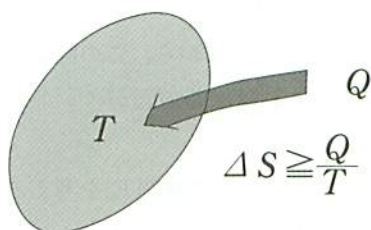


図1 エントロピーの増分

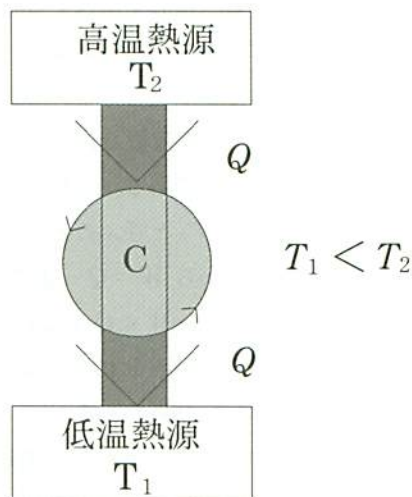


図2 熱のながれ

ただし、 $\Delta T > 0$  だから  $\Delta S_1 > 0$  となる。逆に低温から高温へと熱を流した場合は、 $\Delta T = T_1 - T_2 < 0$  だから  $\Delta S_1 < 0$  となるから、高温から低温へという熱のながれはエントロピーの増大する方向であることが解る。

通常、サイクルCは次に述べるような熱機関とそれに付随する系であって、取り込んだ熱量  $Q$  の一部を仕事（力学的エネルギー）として役立てた後、最終的にはその仕事の分まで熱に変えて環境  $T_1$  に放出する。そのとき環境  $T_1$  のエントロピーは  $\Delta S_1 = Q/T_1$  だけ増大し、これは  $\Delta S$  よりかなり大きい。

### §3. 可逆熱機関のエントロピー表示

エネルギーという物理学の用語が、現在では様々な分野で使われている。経済学ではエネルギーの消費といわれ、エネルギーが消費されてなくなってしまうかのように言われている。ところが、物理学では、エネルギーは保存されるもので、形を変えていくだけであって、消えてなくなるものではない。それでは経済学でエネルギーの消費というときは何を消費しているのだろうか。それは明らかに、石油などの資源の消費である。その際には、使用可能なエネルギーが使用不能なものに転化されることから、消費されるものは資源のもつ使用価値であるといえる<sup>2)</sup>。この価値というあいまいな言葉に代わる用語がエントロピーなのである。このことは、一般的なエネルギー資源の消費は図2のように表され、

そのときエントロピーは必ず増大することからも推量されることである。エネルギー問題は実はエントロピー問題なのである。

熱機関Eのブロックダイアグラムは、通常、図3のように書かれる<sup>3)</sup>。この図でEは高熱源  $T_2$  から熱量  $Q$  を受け取り、その一部を仕事  $W$  に変えて残りの熱量  $Q_1$  を低熱源  $T_1$  に移すようなサイクルである。これはエネルギーの出入に注目して書かれた図なので“熱機関のエネルギー表示”と呼ぶことにしよう。

熱力学の第1法則から  $W = Q - Q_1$  で、第2法則は  $Q$  の全部を  $W$  に変えることはできないと言っているので、 $W < Q$  すなわち  $Q_1 > 0$  である。しかしながら、この図だけでは、なぜ  $Q_1 = 0$  すなわち  $W = Q$  にできないのか解らない。これは、この図がエントロピーの流れを表していないためである。

まず、熱機関のすべての過程が可逆過程で構成されている可逆熱機関  $E_0$  を考える。そのエネルギー表示は図3でEを  $E_0$  とすればよい。熱機関  $E_0$  は可逆なのでその1サイクルで内部のエントロピーの変化はないから、1サイクルの間に  $E_0$  に流入するエントロピーと流出するエントロピーは等しい。すなわち

$$\frac{Q}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1} \quad (3)$$

また仕事  $W$  のエントロピーは0であるから、“可逆熱機関  $E_0$  のエントロピー表示”は図4のようになる。この図から、熱機関  $E_0$  は流入するエントロピーを熱量  $Q_1$  につけて排

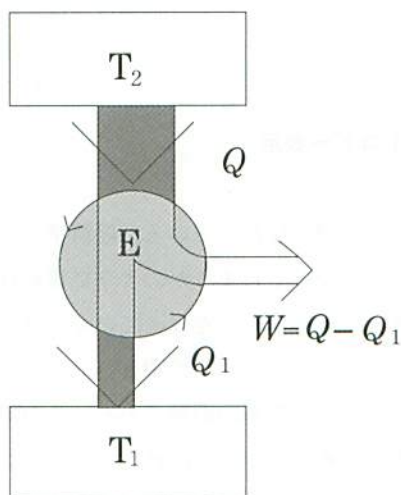


図3 熱機関のエネルギー表示

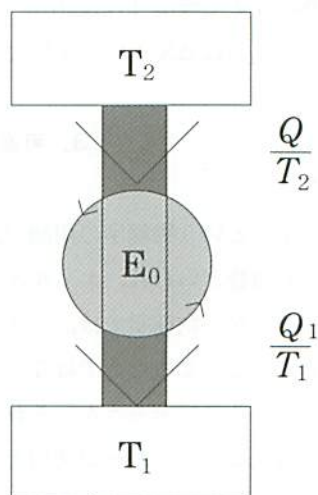


図4 可逆熱機関のエントロピー表示



出することが解る。熱量  $Q_1$  はエネルギー的には無駄なようだが、エントロピーが増大して熱機関が停止してしまわないためにはどうしても必要なものである。

エネルギーとエントロピーという二つの表示は、同じように仕事を取り出す機関である水車の場合にはもっと解りやすい。“水車のエネルギー表示”は図3で  $Q$ ,  $Q_1$  を水の運動エネルギーとすればよい。また、図4で流れるエントロピーを水の量とすれば、この図がいわば、“水車の水量表示”となる。水車にしても熱機関にしても流れがあつてはじめて仕事を取り出せるのであつて、流入するエネルギーをすべて利用しつくして、流れを止めてしまう訳にはいかないのである。

熱機関  $E_0$  が取り出す仕事は、式(3)から、

$$W = Q - Q_1 = \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) Q = \frac{\Delta T}{T_2} Q \quad (4)$$

したがって、熱効率

$$\eta_0 = \frac{W}{Q} = \frac{\Delta T}{T_2} < 1 \quad (5)$$

となる。

#### § 4. 不可逆熱機関のエントロピー表示

不可逆熱機関  $E'$  に流入、流出する熱量をそれぞれ  $Q'$ ,  $Q'_1$  とすると、取り出す仕事は

$$W = Q - Q_1 = Q' - Q'_1 \quad (7)$$

である。熱力学の第2法則から、 $Q < Q'$  が成り立つ<sup>3)</sup>から流れる熱量は次式で表される。

$$Q' = Q + q, \quad Q'_1 = Q_1 + q, \quad q > 0 \quad (8)$$

したがって、流入、流出するエントロピー  $S_2$ ,  $S_1$  は

$$\begin{aligned} S_2 &= \frac{Q'}{T_2} = \frac{Q}{T_2} + \frac{q}{T_2} \\ S_1 &= \frac{Q'_1}{T_1} = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{q}{T_1} \end{aligned} \quad (9)$$

その差は、式(9), (3)から

$$\Delta S = S_1 - S_2 = \frac{\Delta T}{T_1 T_2} q, \quad (10)$$

となる。したがって、不可逆熱機関  $E'$  の“エネルギー表示”および“エントロピー表示”はそれぞれ図5および図6のように表される。図5ではただ無駄に流れているだけにみえ

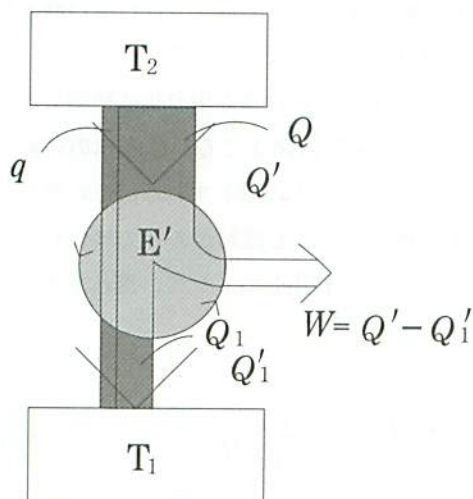


図5 不可逆熱機関のエネルギー表示

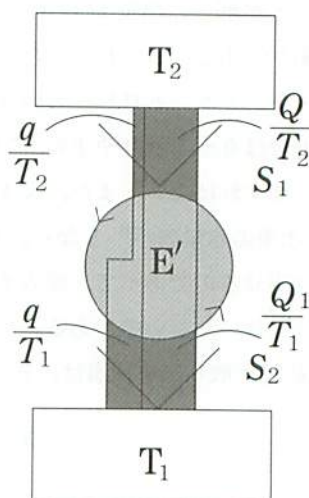


図6 不可逆熱機関のエントロピー表示

る熱量  $q$  が、図6を見れば、式(10)の  $\Delta S$  だけ多くのエントロピーを外部に排出する働きをしていることが解る。すなわち、熱機関  $E'$  はその内部の不可逆過程のために発生したエントロピーを外部に出して永続的に動き続けるために、可逆熱機関より  $q$  だけ多くの熱量を必要とするのである。

### §5. 資源—ゴミ—環境問題理解のために

物理学でのエネルギーの保存と、経済学でのエネルギーの消費という矛盾するようにみえる事柄を説明するために、これも、もとは物理学の用語であったエントロピーを導入した。そして、熱エネルギーを人間の役に立つ仕事に変える装置である熱機関を、エントロピーの流れの中で回転する水車のようなものであると考えると理解しやすいことを示した。

資源の問題は、その不足とその消費によって生じる環境破壊にある。この両方共に解決する方法として資源のリサイクルがある。ところが、このリサイクルの過程でも必ずエントロピーが発生するのである。それを捨てるのにまた資源を必要とするのではリサイクルにはならない。自然は長い間リサイクルを続けて、美しい地球を保ってきたのであるが、以上で議論してきたようなエントロピー的視点から見れば、人間の工業生産工程に乗るようなリサイクルは、まだ一つも実現されていないことが解る。今後も、資源—環境問題を理解する上で、以上のようなエントロピー的視点は重要である。

### 参考文献

- 1) 広重徹訳・解説：カルノー・熱機関の研究（みすず書房，1973）  
朝永振一郎：物理学とは何だろうか（岩波書店，1979）
- 2) 槌田敦：資源物理学入門（NHKブックス，1982）  
槌田敦：熱学外論（朝倉書店，1992）
- 3) 小出昭一郎：熱学（東大出版，1980）  
村田浩他：医歯系の物理学（東京教学社，1987）